

# 3차원 유한요소법을 이용한 장대교량용 가동받침 설계

조종래\*, 이부윤\*\*

## Structural Design of a Movable Bearing Shoe for Large Bridge Using Three Dimensional Finite Element Method

Jong Rae Cho\*, Boo Youn Lee\*\*

### ABSTRACT

Recently, long large bridges are built for mass transportation. Movable bearing shoes are important components of the bridges because they support movement of translation and rotation of bridge. In design stage of the long large bridges, detailed analyses using the finite element method are performed to guarantee safety and reliability. For that purpose, three-dimensional modeling is carried out by I-DEAS software and finite element analysis by ANSYS software. Results of the analyses are reviewed and important design factors for movable bearing shoes are discussed.

**Key Words** : Movable Bearing Shoe(가동받침), Bridge(교량), Finite Element Analysis(유한요소해석), Hertz Contact(헤르쯔 접촉), Detailed Analysis(상세 설계)

### 1. 서론

교량이 구조물로서 그 기능을 발휘하기 위해 상부구조가 하부구조에 의해 안전하게 지지되어야 한다. 교량받침(bearing shoe)은 이러한 조건을 만족하는 기구로서 교량의 상, 하부 접점에 설치되는 구조물이다. 이와 같은 하중의 전달기능 외에 상부구조의 처짐으로 인해 발생하는 회전변위를 받는 기능을 가져야 한다. 특히 교량의 양쪽 받침 중 하나는 하중, 온도변화, 콘크리트의 수축과 같은 수평변위를 흡수하기 위해 조금씩 교량 길이 방향으로 자유스럽게 움직이도록 설계해야 한다. 이것을 가동받침(movable bearing shoe)이라 한다<sup>(1)</sup>. 따라서 교량의 받침은 교량이 구조물로서

의 전반적인 기능을 발휘하게 하고 안전성을 확보하는 큰 역할을 하므로 설계, 제작, 시공 및 유지 관리에도 특히 신중한 배려가 필요하다.

최근 인천의 영종대교, 부산의 광안대교등 장대교량 건설이 증가하고 있다. 따라서, 교각에서 교량을 받쳐주고 있는 교량 받침도 대형화되고 있다. 중소형의 받침을 사용할 때는 고무를 이용하거나 미끄럼판 등을 이용하는 규격품을 선택하여 조립하면 된다. 그러나, 장대교량의 경우에는 작용하중이 크고 하중 조건이 다양하기 때문에 가동받침을 프로젝트 건별로 매번 설계, 제작하여 사용한다. 이 경우에도 설계시방서(관용설계)가 있기 때문에 기본 치수는 설계가 가능하다. 그러나, 각 부위의 응력을 확인하고 설계 타당성

\* 한국해양대학교 기계공학부

\*\* 계명대학교 자동차공학부

을 검증하기 위해서는 유한요소해석이 필요하다 (2,3)

본 연구에서는 장대교량용 가동받침을 대상으로 3차원 유한요소해석을 수행하여 해석된 결과를 관용계산의 결과와 비교하여 해석 방법을 확립하고 관용계산의 타당성을 확인하는데 목적이 있다. I-DEAS<sup>(4)</sup>를 이용하여 형상을 모델링하였으며, 해석과 후처리 과정은 ANSYS<sup>(5)</sup>를 사용하였다.

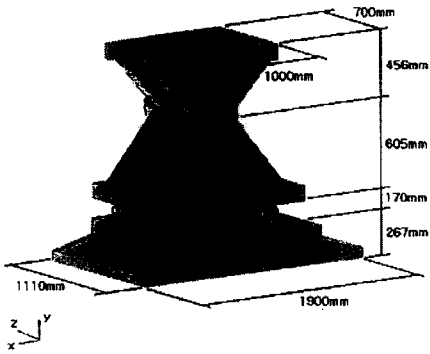


Fig. 1 Schematic drawing and dimensions of a movable bearing shoe

Fig. 1은 대표적인 장대 교량에 사용되는 연직하중 3,000톤 용량의 가동받침의 1/2 형상을 나타낸 것이다. XY평면에 대해서 대칭이기 때문에 1/2 만 모델링하여 해석한다. 이동량이 없을 때( $e = 0$ )와 최대로 이동했을 때( $e = 220mm$ )의 두 가지로 나누어 모델링하였다. 각 재료의 종류는 Fig.2와 같고, 허용응력은 Table 1과 같다. 저판 아래부분은 몰타르층이기 때문에 허용응력은  $3kgf/mm^2$ 이다. Fig. 3은 최대 이동시의 3차원 유한요소모델을 나타낸 것이다. 가동받침뿐만 아니라 받침을 지지하고 있는 콘크리트 교각부도 포함시켜서 모델링하여 콘크리트가 받는 압축응력도 함께 평가하였다. 상판, 하판, 저판, 핀, 콘크리트는 회전 자유도를 갖는 8절점 SOLID73 요소<sup>(5,6)</sup>를 사용하였다. 여기서, 롤러(roller) 부분은 높이가 같고 면적이 같은 등가의 셸(shell) 요소로 Fig.4와 같이 모델링하였다. 롤러부는 접촉 응력이 중요한 관심사이기 때문에 길이 방향의 하중 분포를 구하는 데는 셸요소로 모델링하는 것이 타당하다. 롤러는 4절점 선형인 SHELL63 요소로 모델링하였으며 셸요소의 두께로는 롤러와 단

면적이 같은 등가의 두께(162mm)를 사용하였다.

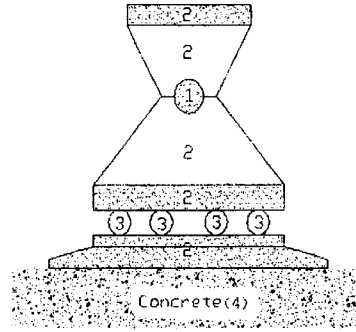


Fig. 2 Material numbers used in computation

Table 1 Allowable stresses ( $kgf/mm^2$ ) of materials

종 류	축방향 응력		횡응력		항부응력	지압응력(헬츠 공식으로 계산한 경우)	
	인장	압축	인장	압축		지압응력	필요경도
1 (S35CN)	19	19	19	19	31	72	HB149이상
2 (LMnS2)	19	19	19	19	35	78	HB163이상
3 (C-13B)	30	30	30	30		190	HB475이상
4 (콘크리트)		3					

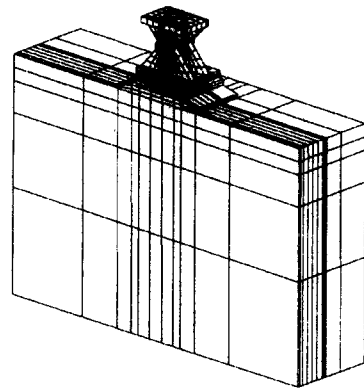


Fig. 3 Finite element model in case of maximum translation

## 2. 유한요소 모델링

Table 2는 유한요소모델을 정리한 것으로 이동량이 없을 경우의 모델명은 M3T1-C이고, 이동량이 최대일 경우 M3T2-C이다. 콘크리트의 재료상수는 도로교 표준시방서<sup>(1)</sup>에서  $\sigma_{ck} = 240 \text{ kgf/cm}^2$ 에 준하여 Table 3에 정리하였다

연직 방향에 작용하는 하중은 Table 2와 같이 상판에 등가의 압력하중을 작용시켰다. 각 모델에 적용한 경계조건은 다음과 같다.

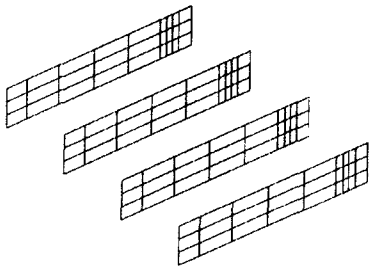


Fig. 4 Finite element model of rollers

Table 2 Description of finite element models

명칭	전반력(tonf) 등가하중(kgf/mm <sup>2</sup> )	이동량 (mm)	절점수	요소수
M3T1-C	2882	0	3157	2058
M3T2-C	2.051	220		

Table 3 Material constants of concrete

재료상수		상수값
탄성계수	$E_c$	$2.60 \times 10^3 \text{ kgf/mm}^2$
포아송비	$\nu$	0.3
전단계수	$G_c$	$\frac{E_c}{2.3} = 1130.43 \text{ kgf/mm}^2$

- (1) 상판, 하판과 핀부가 접하는 접촉면에는 핀의 반경방향 자유도를 연계(couple)시켜서 핀의 반경 방향으로 같은 변위를 갖도록 한다.
- (2) 롤러부와 하판, 저판이 만나면서 형성되는 접촉선에는 연직 방향인 y방향 자유도를 연계시켜서 y방향으로 같은 변위를 갖도록 한다.
- (3) 대칭면은 대칭 경계조건을 적용한다.
- (4) 핀과 롤러의 중앙부는 강제 운동을 방지하기 위하여 x축 방향으로 구속한다.

- (5) 교각 하단부는 고정 경계조건을 적용한다.

### 3. 해석결과 및 고찰

Fig.5는 최대 이동시의 변형 형상을 나타낸 것이며 최대 변위는 1.92mm이다. 회전 자유도가 없는 8절점 SOLID45 요소를 사용했을 때 최대 변위는 1.08mm로 나타났으며 전체적인 응력이 SOLID73에 비해 작았다. 그러나 20절점 SOLID95 요소를 사용했을 때는 SOLID73의 결과와 거의 일치하였다. 응력을 평가할 각각의 위치와 해석 결과는 다음과 같다.

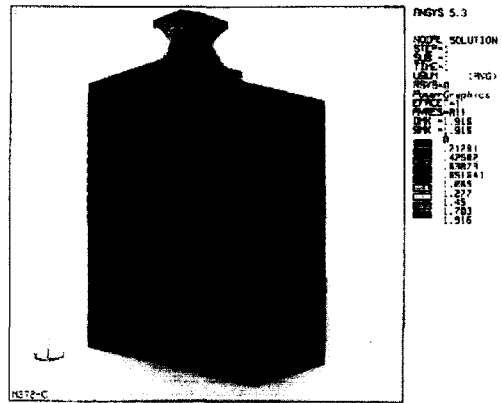


Fig. 5 Deformation contour in case of maximum translation

- (1) 핀의 지압응력

Fig.6과 같이 핀과 상판, 하판이 접하는 면에서 국부적으로 최대  $45.82 \text{ kgf/mm}^2$ 의 지압 응력이 발생하고 있으나, 이는 요소 절점의 국부적인 접촉으로 피크(peak) 응력이 발생하기 때문으로 헤르쯔(Hertz) 접촉의 양상을 보인다. 따라서 헤르쯔 접촉의 허용 응력  $72 \text{ kgf/mm}^2$ 와 비교하여 안전하다.

- (2) 상판의 지압 응력과 최대 주응력

핀과 상판, 하판이 접하는 면에서 국부적으로 최대  $23.45 \text{ kgf/mm}^2$ 의 지압 응력이 발생하고 있으나 (Fig.7), 이는 (1)항과 마찬가지로 요소 절점의 국부적인 접촉으로 피크 응력이 발생하기 때문으로 헤르쯔 접촉의 양상을 보인다. 따라서 헤르쯔 접촉의 허용응력  $78 \text{ kgf/mm}^2$ 와 비교하여 안전하다. 상판 구조물 자체의 건진성을 평가하기 위해 최대 주응

력은  $12.99\text{kgf/mm}^2$ 으로(Fig.8) 허용 인장응력  $18.70\text{kgf/mm}^2$ 과 비교한 결과 안전하다.

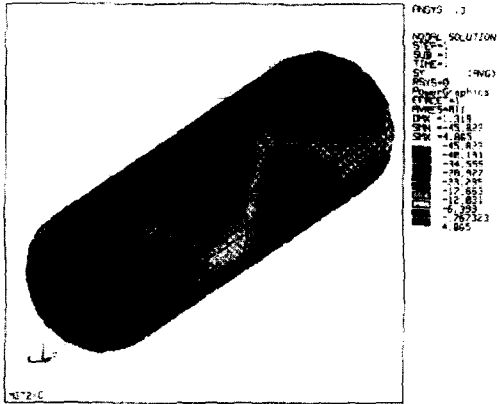


Fig. 6 Contour of vertical directional stress in pin

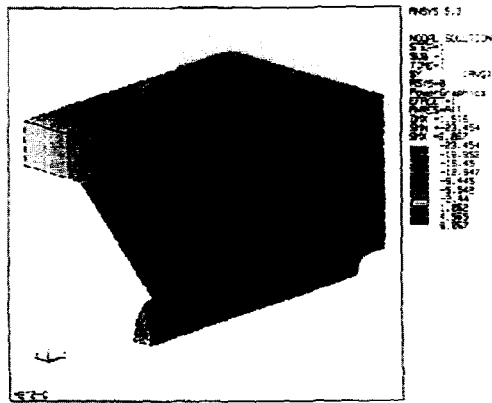


Fig. 7 Contour of vertical directional stress in upper part

(3) 하판의 지압 응력과 최대 주응력

편과 상판, 하판이 접하는 면에서 국부적으로 최대  $24.54\text{kgf/mm}^2$ 의 지압 응력이 발생하고 있으나(Fig.9), 헤르쯔 접촉의 허용응력  $78\text{kgf/mm}^2$ 과 비교하여 안전하다. 하판 구조물의 아래면은 굽힘하중을 주로 받는데, 자체의 건전성을 평가하기 위한 최대주응력은  $15.35\text{kgf/mm}^2$ 로 허용 인장응력  $18.70\text{kgf/mm}^2$ 과 비교한 결과 안전하다(Fig.10).

(4) 저판의 최대 주응력

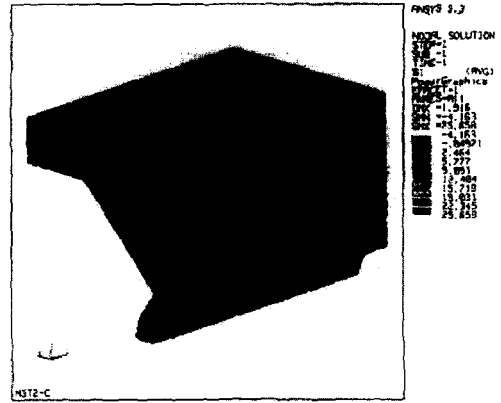


Fig. 8 Contour of maximum principal stress in upper part

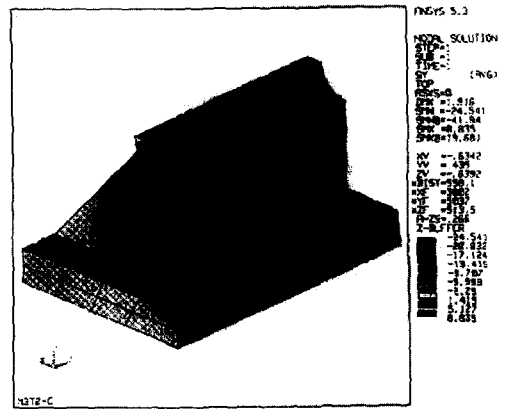


Fig. 9 Contour of vertical directional stress in lower part

저판에 작용하는 최대 주응력은  $7.83\text{kgf/mm}^2$ 으로 허용 인장응력  $18.70\text{kgf/mm}^2$ 과 비교한 결과 안전하다(Fig.11).

(5) 콘크리트의 지압 응력

전반력 하에서 콘크리트에 작용하는 지압 응력은  $1.37\text{kgf/mm}^2$ 로서 허용치  $3.00\text{kgf/mm}^2$ 과 비교하여 안전하다(Fig.12).

(6) 롤러의 지압 응력

가동받침의 경우 롤러는 가장 중요한 요소 중의 하나이다. Fig.13은 롤러당 총 반력을 관용계산과

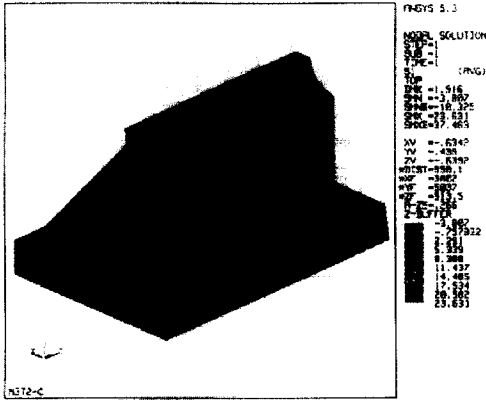


Fig. 10 Contour of maximum principal stress in lower part

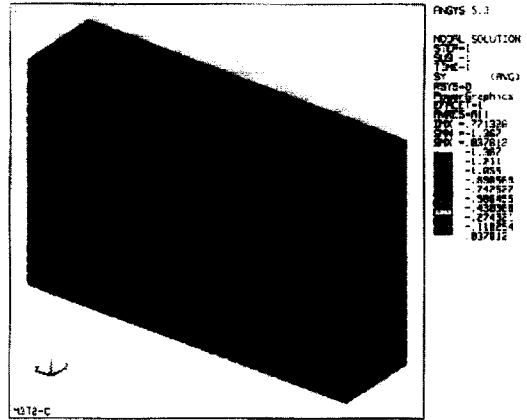


Fig. 12 Contour of vertical directional stress in concrete

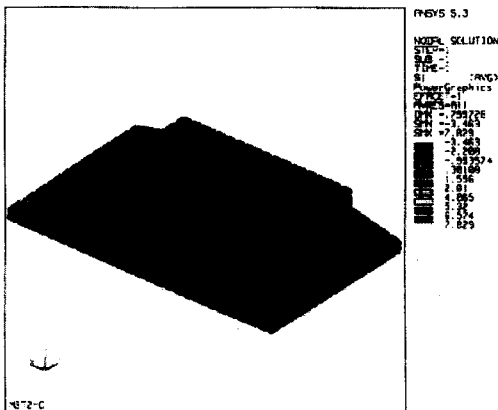


Fig. 11 Contour of maximum principal stress in bottom plate

비교한 것으로, 이동량이 있을 경우 관용계산과 달리 유한요소해석 결과는 3번째 롤러에서 가장 큰 반력이 발생하고 있음을 알 수 있다. Fig.14는 롤러의 단위 길이당의 지압 하중을 나타낸 것이다. 단위 길이 당의 지압 하중은 절점 응력에 쉘요소의 두께를 곱하여 계산하였다.

선 접촉의 헤르쯔 식에 적용하기 위해서 두 절점사이의 평균 지압 응력을 계산하였으며 최대 헤르쯔 응력은 다음과 같다.

$$P = 0.5 \times (558.9 + 1189.1) = 847 \text{ kgf/mm}$$

$$\begin{aligned} \sigma_h &= 0.418 \sqrt{\frac{P \times E}{R}} \\ &= 0.418 \sqrt{\frac{847 \times 21000}{85}} \\ &= 192.2 \text{ kgf/mm}^2 \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $P$ 는 단위 길이당의 지압하중 ( $\text{kgf/mm}$ ),  $E$ 는 탄성계수 ( $\text{kgf/mm}^2$ ),  $R$ 은 롤러의 반경 ( $\text{mm}$ )을 나타낸다. 이상에서 계산된 헤르쯔 응력은 허용응력  $190\text{kgf/mm}^2$ 을 약간 초과하는 것으로 나타났다.

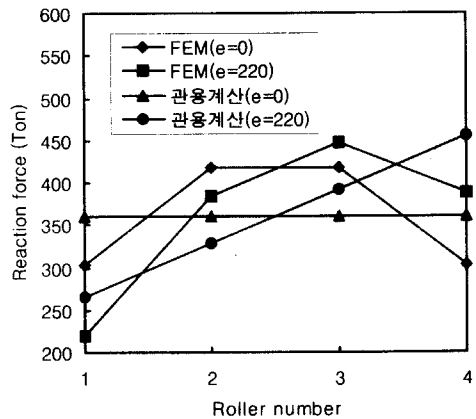


Fig. 13 Reaction forces in rollers

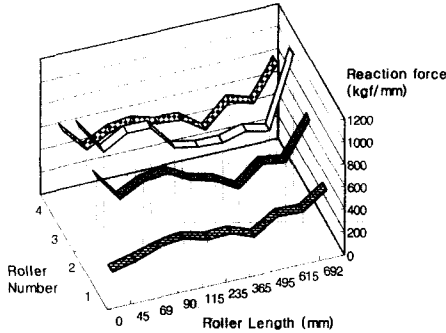


Fig. 14 Bearing load per unit length of rollers

#### 4. 롤러의 초과 헤르쯔 응력의 처리 방법

앞 절의 결과와 같이 롤러의 지압응력이 수치적으로 허용치보다 조금 높은 것으로 나타났으므로 지압 응력을 줄이기 위해서는 롤러의 직경이나 길이를 증가시켜야 한다. 그러나 가동받침의 전체 높이는 거의 고정되어 있기 때문에 직경을 증가시키는데는 한계가 있다. 이렇게 지압 응력이 허용치를 많이 초과하지 않을 경우에는 제작상 두 가지 방법으로 해결할 수 있다.

##### 4.1 롤러의 경도를 높이는 방법

헤르쯔 허용응력은 도로교받침 편람에 따르면 식 (2)와 같이 브리넬 경도의 함수로 나타낼 수 있다. 롤러 소재인 C-13B의 실제 경도는  $H_B = 550 \sim 580$  정도이기 때문에 실제 허용응력은  $206 \sim 210 \text{ kgf/mm}^2$ 이므로 지압 응력이 허용치를 초과하지 않는 것으로 판단할 수 있다.

$$\sigma_{bz} = \frac{100H_B}{200 \left( \frac{H_B^2}{90000} + 1 \right)} \quad (\text{kgf/mm}^2) \quad (2)$$

##### 4.2 롤러에 크라운을 주는 방법

롤러에 작용하는 지압 응력은 롤러의 중앙부보다는 양 끝단에서 높게 발생한다. 즉, 허용치를 초과하는 부분은 양 끝단이므로 이 부분의 처리를 통하여 응력 초과분을 해소할 수 있다. 구체적인 방법으로 롤러의 양 끝단에 라운딩(rounding)을 하거나 크라운(crown) 처리를 하여 피크값을 낮추는 방법이 있다.

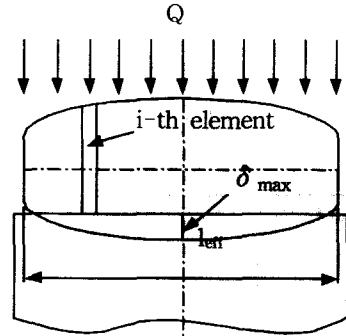


Fig. 15 Load distribution on crowned roller by Harris<sup>(7)</sup>

Harris<sup>(7)</sup>에 의하면 Fig.15와 같이 2개의 물체가 접촉할 때 하중에 대응하는 접촉면 중앙의 반경 방향 변위  $\delta_{max}(\text{mm})$ 는 미지수이고 시편의 유효 접촉 길이  $l_{eff}(\text{mm})$ 를  $n$ 등분한 요소의 폭을  $w$ 라고 할 때,  $i$ 번째 요소에 작용하는 지압 응력  $q_i$ 는 다음과 같다.

$$q_i = \frac{(\delta_{max} - \epsilon_i)^{\frac{1}{0.9}}}{0.0193 \frac{1}{0.9} \frac{0.1}{l_{eff}^{0.9}}} w \quad (3)$$

여기서  $(\delta_{max} - \epsilon_i) \leq 0$ 인 경우에는  $q_i = 0$ 이고,  $\epsilon_i(\text{mm})$ 는  $i$ 번째 요소의 크라운 량이다.

전체의 접촉 하중  $Q$ 와의 관계는 다음과 같다.

$$\sum_{i=1}^n q_i = Q \quad (4)$$

$\delta_{max}$ 가 주어지면 식 (3)에 의해  $q_i$ 가 구해지고 접촉 응력이 결정된다. 피로수명 실험 결과에 의하면 중앙부와 끝단부의 응력비가 1.42:1이 되도록 설계하는 것이 최적 조건으로 알려져 있다<sup>(8)</sup>. 식(3)과 (4)와 응력비를 이용하여 롤러에 작용하는 지압 응력의 분포를 구한다. 이 가동받침의 경우 최적 조건은 크라운 곡률 반경이  $485\text{m}$ 일 때 중심부의 최대 접촉 응력은  $185.4 \text{ kgf/mm}^2$ 으로 나타났다.

#### 5. 결론

장대교량에 사용되는 가동받침의 상세설계를

위하여 3차원 유한요소해석을 수행하여 고찰하였다. I-DEAS를 이용하여 형상 모델링을 하였으며, 해석과 후처리 과정은 ANSYS를 사용하였다. 해석된 결과를 관용계산의 결과와 비교하여 해석 방법과 기준을 확립하고 관용계산의 타당성을 확인하였다. 또한 롤러의 초과 지압 응력을 처리하는 방법을 제시하여 적용하였다. 본 연구에서 제시된 가동받침의 3차원 유한요소해석 방법은 장대교량의 설계와 제작시 실제적으로 적용될 수 있다.

### 참고문헌

1. 대한토목학회, "도로교 표준 시방서-설계/시공 및 유지-," 대한토목학회, 1996.
2. 平山純一, 大橋治一, "与道橋 3P 가동지승의 설계와 제작," 교량과 기초, 제86호 11권, pp. 29-37, 1986.
3. 平山純一, 山岸一彦, "与道橋 3P 가동지승의 설계와 롤러 내구시험," 本四技報, 제37호, pp. 20-26, 1986.
4. I-DEAS Master series, Exploring I-DEAS Design, Structural Dynamics Research Corporation, 1998.
5. ANSYS users manual, Swanson Analysis System Inc., 1997.
6. Yunus, Shah M., Pawlak, Timothy P., and Cook R.D., "Solid elements with rotational degrees of Freedom Part 1 and Part 2," International Journal for Numerical Methods in Engineering, Vol. 31, pp. 573-610, 1991.
7. Harris, T. A., "Misaligned roller bearings," Machine Design, Vol. 29, pp. 98, 1968.
8. Ito, S. and Sugiura, I., "Investigation of optimal crowning in line contact cylinder to cylinder type rolling contact fatigue test rig," Bearing Engineer, No. 48, pp. 18-26, 1982.